

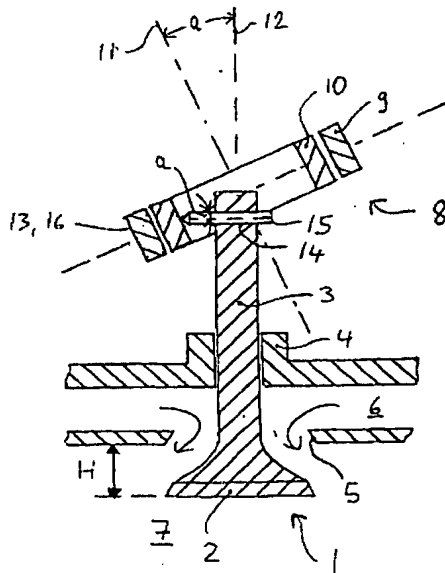
**Electrical valve drive for internal combustion engine gas exchange valves,  
has rotation axis of electrical machine inclined to valve lift direction so  
machine rotary motion is converted to valve lifting motion**

Publication number: DE10151201  
Publication date: 2003-04-30  
Inventor: MASBERG ULLRICH (DE)  
Applicant: MASBERG ULLRICH (DE)  
Classification:  
- International: F01L9/04; F01L9/04; (IPC1-7): F01L9/04  
- European: F01L9/04  
Application number: DE20011051201 20011017  
Priority number(s): DE20011051201 20011017

Report a data error here

**Abstract of DE10151201**

The drive has a rotary electrical machine (8) whose rotor (10) is coupled to a gas exchange valve (1) of the internal combustion engine. The axis of rotation (11) of the electrical machine is inclined with respect to the valve lift direction (12) so that a rotary motion of the electrical machine is converted into a lifting motion of the valve. AN Independent claim is also included for the following: (i) Combustion engine with gas shuttle valves and at least an electrical valve impulse after one of the other claims.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

**19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

**Offenlegungsschrift**  
**DE 101 51 201 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**F 01 L 9/04**

21 Aktenzeichen: 101 51 201.5  
 22 Anmeldetag: 17. 10. 2001  
 43 Offenlegungstag: 30. 4. 2003

**DE 101 51 201 A 1**

**71) Anmelder:**  
Masberg, Ullrich, Prof. Dr., 51503 Rösrath, DE

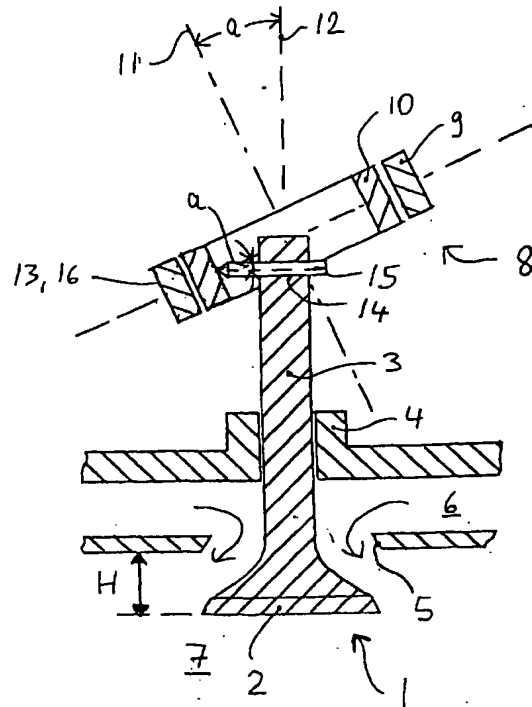
**74) Vertreter:**  
Willich, W., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 80538 München

⑦2 Erfinder:  
Masberg, Ullrich, 51503 Rösrath, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤4 Elektrischer Ventiltrieb für einen Verbrennungsmotor und Verbrennungsmotor mit derartigem Ventiltrieb

57 Die Erfindung betrifft einen elektrischen Ventiltrieb für einen Verbrennungsmotor, mit einer rotatorischen elektrischen Maschine (8), deren Rotor (10) mit einem Gaswechselventil (1) des Verbrennungsmotors (31) gekoppelt ist, dadurch gekennzeichnet, daß die Rotationsachse (11) der elektrischen Maschine (8) schräg zur Hubrichtung (12) des Ventils (1) verläuft, so daß eine Drehbewegung der elektrischen Maschine (8) in eine Hubbewegung des Ventils (1) umgesetzt wird. Die Erfindung betrifft auch einen Verbrennungsmotor mit Gaswechselventilen und wenigstens einem derartigen elektrischen Ventiltrieb.



DE 101 51 201 A 1

[0001] Die Erfindung betrifft allgemein Ventiltriebe für Verbrennungsmotoren, und insbesondere einen elektrischen Ventiltrieb für einen Verbrennungsmotor, mit einer rotatorischen elektrischen Maschine, deren Rotor mit einem Gaswechselventil des Verbrennungsmotors gekoppelt ist. Die Erfindung betrifft auch einen Verbrennungsmotor mit wenigstens einem derartigen elektrischen Ventiltrieb.

[0002] Bei Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung erfolgt beim 4-Takt-Verfahren die Steuerung des erforderlichen Gas- oder Ladungswechsels mit Gaswechselventilen (auch bei bestimmten Zweitaktmotorkonstruktionen kommen Gaswechselventile zur Anwendung). Herkömmlicherweise werden beim 4-Takt-Verfahren zur Steuerung des Gaswechsels eine oder mehrere, mit halber Motordrehzahl drehende Nockenwellen von der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors angetrieben. Die Nockenwellen öffnen die für das Ausschleiben der verbrauchten Gase und Ansaugen der Frischgase separat ausgelegten Gaswechselventile gegen Ventildfedern. Bei der Mehrzahl der derzeit in Großserie hergestellten Verbrennungsmotoren stehen die Nockenwellen in einer festen Winkelbeziehung zur Kurbelwelle, das Öffnen und Schließen der Ventile erfolgt also bei festen Winkelstellungen der Kurbelwelle, bezogen auf deren 720°-Umlaufperiode beim 4-Takt-Verfahren.

[0003] Derartige starre Steuerzeiten für die Ventile sind jedoch nicht als optimal anzusehen, da im Hinblick auf bestmöglichen Wirkungsgrad und möglichst hohes Drehmoment bei allen Drehzahlen variable Steuerzeiten als Funktion der Drehzahl und ggf. weiterer Motorparameter (z. B. der Last) erforderlich wären. Starre Steuerzeiten stellen hingegen einen wirkungsgradmindernden Auslegungs-Kompromiß hinsichtlich der bei verschiedenen Drehzahlen erreichbaren Mitteldrücke (und damit Drehmomente) dar. Je höher die Nenndrehzahl oder je breiter das nutzbare Drehzahlband eines Verbrennungsmotors ist, desto unbefriedigender fällt dieser Kompromiß aus. Im Hinblick auf den zunehmend als wichtig erkannten sparenden Umgang mit Ressourcen und die Reduzierung umweltschädlicher oder klimaaktiver Abgasemissionen besteht daher ein Bedürfnis nach Ventiltrieben mit variablen Steuerzeiten. Während nämlich andere Ansätze zur Wirkungsgraderhöhung und Emissionsminderung (z. B. durch elektronische Steuerung der Einspritzmenge und des Zündzeitpunkts) als weitgehend ausgereizt gelten und deren weitere Optimierung bei vertretbarem Aufwand nur noch kleinere Verbesserungen zu erwarten läßt, können aus heutiger Sicht durch Ventiltriebe mit variablen Steuerzeiten signifikante Wirkungsgradverbesserungen und Emissionsreduzierungen erreicht werden.

[0004] Es gibt bereits eine Reihe von Vorschläge, variable Steuerzeiten durch eine verstellbare Ausführung der Nockenwelle, der Nocken oder eines Nockenübertragers zu erzielen. Bei einer bekannten derartigen Lösung wird die Einlaßnockenwelle über einen Hydrauliksteller in Abhängigkeit von der Motordrehzahl verdreht (Alfa Romeo, Mercedes-Benz). Gemäß einem weiteren derartigen Vorschlag erfolgt die Veränderung der Ventilsteuerzeiten durch Schalten von zwei unterschiedlichen Nockenformen (Honda). Gemäß einer noch weiteren derartigen Lösung erfolgt eine stufenlose Änderung der Ventilsteuerzeiten mit Hilfe von räumlichen Nockenprofilen auf einer längsverschieblichen Nockenwelle (Fiat) (siehe H. Bauer (Red.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch/Bosch, 22. Auflage, 1995, S. 374-376). BMW bietet schließlich seit kurzem Serienfahrzeuge mit einer Ventilsteuerung mit dem Markennamen "Valvetronic" an, bei der die Steuerzeiten der Einlaßventile mit Hilfe eines verstellbaren Nockenübertragers variiert werden können.

[0005] Obgleich diese Lösungen, die auf einer mechanischen Verstellung des von der Kurbelwelle abgeleiteten Nockenantriebs beruhen, zu Verbesserungen hinsichtlich Wirkungsgrad- und Abgasemissionsverhalten führen, ist der konstruktive Aufwand bei zumindest einigen dieser Lösungen beträchtlich, und die Möglichkeiten zur Variation der Steuerzeiten sind konstruktiv beschränkt.

[0006] Jenseits dieser, auf einer Relativ-Verstellung des Nockenantriebs gegenüber der Kurbelwelle beruhenden Lösungen wurden bereits elektrische Ventiltriebe vorgeschlagen, welche eine weitgehend freie Wahl der Ventilsteuerzeiten unabhängig von der Kurbelwellenstellung erlauben. Meist sind hierbei – obwohl dies nicht zwingend ist – individuelle Ventiltriebe für die einzelnen Ventile vorgesehen, was konstruktiv besonders einfach ist. Als einfachste Lösung dieser Art wurde vorgeschlagen, den Ventilschaft als eine Art Resonanz-Schwinger zwischen den Endlagen zweier elektrischer Spulen auszubilden. Während der Öffnungs- und Schließbewegung fliegt der Ventilschaft weitgehend unkontrolliert, lediglich in den Endlagen wird er in seiner Position erfaßt und durch mechanische Federn abgebremst. Ein Problem bei dieser Lösung ist, daß der Ventilsitz im Zylinder des Verbrennungsmotors mit relativ hoher Geschwindigkeit getroffen wird und es daher zu relativ lauten, in hohem Frequenzbereich liegenden Klappergeräuschen kommt.

[0007] Gemäß einem weitergehenden Vorschlag soll dieses Problem durch Verwendung eines elektromagnetischen Linearmotors, der die Information über die Lage des Ventils aus der Bewegung des Ventilschafts erhält, vermieden werden. Es ist damit – anders als bei der obigen Lösung – möglich, die Ventilgeschwindigkeit zu den Endlagen hin auf Null herunter zu regeln. Die Linearmotor-Lösung läßt aber einen relativ hohen Leistungsbedarf und daher nicht ganz befriedigenden Wirkungsgrad erwarten.

[0008] Darüber hinaus sind bereits elektrische Ventiltriebe der eingangs genannten Art vorgeschlagen worden, welche mit einer rotatorischen elektrischen Maschine ausgerüstet sind, deren Rotor mit einem Gaswechselventil des Verbrennungsmotors gekoppelt ist. Beispielsweise ist aus der DE 198 60 451 A1 ein Ventiltrieb in Form eines elektromagnetischen Drehstellers bekannt. Die Achse des Drehstellers verläuft quer und seitlich versetzt zur Ventilachse. Mit dem Rotor des Drehstellers ist ein Schwenkhebel fest gekoppelt, welcher über ein Drehgelenk mit dem Ende des Ventilschafts verbunden ist. Das Öffnen des Ventils erfolgt durch Drehung des Drehstellers in der einen Richtung, und das Schließen des Ventils durch Drehung in der anderen Richtung.

[0009] Weitere elektrische Ventiltriebe mit Drehstellern sind aus der US-Patentschrift 5,873,335 bekannt. Bei einer in der dortigen Fig. 5 gezeigten Ausführungsform verläuft die Achse des Drehstellers parallel und seitlich versetzt zur Ventilschaftachse. Der Drehsteller dreht einen Steuerkörper, welcher mit einer nicht vollständig umlaufenden Kulissenbahn ausgerüstet ist, deren höchster und tiefster Punkt mit der Geschlossenstellung bzw. Offenstellung des Ventils korrespondiert. Der Ventilschaft ist mit einer Stange ausgerüstet, an welcher ein in die Kulissenbahn eingreifender Gleitstein angeordnet ist. Durch Drehung des Drehstellers in der einen Richtung wird die Stange abgesenkt und damit das Ventil geöffnet, durch Drehung in der anderen Richtung wird sie angehoben und damit das Ventil geschlossen.

[0010] Ein weiterer Ventiltrieb mit einer rotatorischen elektrischen Maschine ist schließlich aus der US-Patentschrift 5,327,856 bekannt. Bei der elektrischen Maschine handelt es sich hier um eine umlaufende Maschine (d. h. eine Maschine, die eine unbegrenzte Anzahl von vollständi-

gen Drehungen in einer Drehrichtung ausführen kann), welche konzentrisch zur Ventilschaftachse angeordnet ist. Die Maschine dreht einen Steuerkörper, welcher eine vollständig umlaufende Kulissenbahn aufweist. Deren höchster bzw. tiefster Punkt entspricht der Geschlossenstellung bzw. Offenstellung des Ventils. Zur Ventilbetätigung wird die elektrische Maschine nicht - wie bei den beiden vorgenannten Vorschlägen - für jede einzelne Ventilbetätigung aus dem Stillstand beschleunigt und wieder zum Stillstand gebracht. Vielmehr dreht die elektrische Maschine fortwährend in einer Richtung, wobei die Kulissenbahn im Steuerkörper so ausgebildet ist, daß das Ventil über ungefähr  $\frac{3}{4}$  des Umlaufs geschlossen ist (ungefähr entsprechend dem Verdichtungsstakt, Verbrennungsstakt und einem der beiden Gaswechseltakte) und nur ungefähr über ein  $\frac{1}{4}$  eines Umlaufs geöffnet ist (im wesentlichen entsprechend dem anderen Gaswechseltakte). Eine Veränderung der Ventilsteuerzeiten kann bei diesem Vorschlag dadurch erzielt werden, daß die elektrische Maschine jeweils innerhalb eines Umlaufs beschleunigt und abbremst, so daß bei insgesamt ungeänderter Gesamtumdrehungszeit bestimmte Winkelbereiche schneller und andere langsamer durchlaufen werden.

[0011] Grundsätzlich erscheinen die auf rotatorischen elektrischen Maschinen beruhenden Vorschläge vorteilhaft, da sie teilweise eine sehr flexible Verstellung der Ventilsteuerzeiten und zum Teil eine Steuerung der Ventilbewegung über den gesamten Ventilhub erlauben und dabei im Vergleich zu verstellbaren Nockenwellen - mechanisch relativ einfach aufgebaut sein können. Nach diesseitiger Kenntnis konnte sich aber in der Praxis noch keiner dieser Vorschläge durchsetzen.

[0012] Die vorliegende Erfindung stellt einen elektrischen Ventiltrieb für einen Verbrennungsmotor bereit, welcher mit einer rotatorischen elektrischen Maschine ausgerüstet ist. Der Rotor der elektrischen Maschine ist mit einem Gaswechselventil des Verbrennungsmotors gekoppelt. Die Rotationsachse der elektrischen Maschine verläuft schräg zur Hubrichtung des Ventils, so daß eine Drehbewegung der elektrischen Maschine in eine Hubbewegung des Ventils umgesetzt wird.

[0013] Die Erfindung schlägt auch einen Verbrennungsmotor vor, der mit wenigstens einem elektrischen Ventiltrieb mit einer rotatorischen elektrischen Maschine ausgerüstet ist. Der Rotor der elektrischen Maschine ist mit einem Gaswechselventil des Verbrennungsmotors gekoppelt. Die Rotationsachse der elektrischen Maschine verläuft schräg zur Hubrichtung des Ventils, so daß eine Drehbewegung der elektrischen Maschine in eine Hubbewegung des Ventils umgesetzt wird.

[0014] Die Erfindung wird nun anhand von bevorzugten beispielhaften Ausführungsformen und der angefügten beispielhaften Zeichnung näher erläutert. In der schematischen Zeichnung zeigen:

[0015] Fig. 1 eine Seiten-Schnittansicht eines ersten Ausführungsform eines elektrischen Ventiltriebs in Offen- und Geschlossenstellung des Ventils;

[0016] Fig. 2 eine schematisierte Draufsicht auf den Ventiltrieb von Fig. 1;

[0017] Fig. 3 ein Diagramm der Ventilstellung und der Drehgeschwindigkeit der elektrischen Maschine als Funktion des Drehwinkels bei der Ausführungsform von Fig. 1;

[0018] Fig. 4 eine Fig. 1 entsprechende Ansicht einer zweiten Ausführungsform;

[0019] Fig. 5 eine Fig. 2 entsprechende Ansicht der zweiten Ausführungsform;

[0020] Fig. 6 eine Fig. 3 entsprechendes Diagramm der zweiten Ausführungsform;

[0021] Fig. 7 eine Funktionsblockdarstellung der Spei-

sung und Steuerung eines elektrischen Ventiltriebs;

[0022] Fig. 8 eine Draufsicht eines Verbrennungsmotors mit einem elektrischen Ventiltrieb für jedes Ventil.

[0023] In den Figuren sind funktionsgleiche oder -ähnliche Teile zum Teil mit gleichen Bezugszeichen gekennzeichnet.

[0024] Bevor die Figuren näher erläutert werden, folgen zunächst einige Anmerkungen zu den bevorzugten Ausführungsformen.

[0025] Bei den bevorzugten Ausführungsformen ist das Ventil zur Umsetzung der Drehbewegung in die Hubbewegung an einem Anlenkungspunkt mit dem Rotor gekoppelt, welcher sich auf einem, gegenüber der Hubrichtung des Ventils geneigten Kreis bewegt. Dieser wird durch die Drehung des Rotors definiert. Die vom Kreis aufgespannte Ebene steht also senkrecht auf der Rotationsachse der elektrischen Maschine. Die Rotationsachse verläuft schräg gegenüber der Hubrichtung des Ventils. Die Neigung der Kreisbahn am Anlenkungspunkt relativ zur Ventilachse ändert sich im Verlauf einer Rotordrehung. Daher sind bei den bevorzugten Ausführungsformen der Rotor und das Ventil über ein Drehgelenk gekoppelt. Eine weitere Folge der Schrägstellung ist, daß der Kreis des Anlenkungspunkts, projiziert auf eine Ebene senkrecht zur Ventil-Hubrichtung, als Ellipse erscheint. Bei einer Rotordrehung ändert sich daher der Abstand des Anlenkungspunkts zur Ventilachse geringfügig. Bei den bevorzugten Ausführungsformen sind daher der Rotor und das Ventil so miteinander gekoppelt, daß der entsprechende Längenausgleich möglich ist. Zum Beispiel sorgt eine Geradföhrung oder, alternativ, ausreichendes Spiel im Drehgelenk für den erforderlichen Längenausgleich.

[0026] Bei (nicht gezeigten) Ausführungsformen kann das Ventil mit einer Verdrehsicherung (z. B. einer Föhrung an Ventilschaft und Ventilbuchse) ausgerüstet sein, welche eine Übertragung der Rotation der elektrischen Maschine bei der Ventilbetätigung auf das Ventil verhindert. Es wurde aber erkannt, daß eine Drehung des Ventils während des Öffnungs- und Schließvorgangs vorteilhaft sein kann, beispielsweise kann eine Drehung der Einlaßventile die Verwirbelung des Kraftstoff-/Luftgemisches beim Einspritzvorgang in der Brennkammer unterstützen und so zu einem verbesserten Verbrennungsablauf beitragen. Vorzugsweise wird daher das Ventil bei einer Ventilbetätigung um seine eigene Achse gedreht. Bei den bevorzugten Ausführungsformen geschieht dies durch eine Übertragung der Rotation der elektrischen Maschine auf das Ventil.

[0027] Bei von der Kurbelwelle abgeleiteten Ventiltrieben sorgt der Ventiltrieb üblicherweise nur für das Öffnen der Ventile, das Schließen der Ventile erfolgt hingegen durch ein Rückholelement, meist eine Feder. Grundsätzlich ist derartige auch bei einem elektrischen Ventiltrieb möglich. Bei den bevorzugten Ausführungsformen erlaubt der elektrische Ventiltrieb jedoch eine Ventilbetätigung in beiden Richtungen und ein genaues Anfahren der Endpunkte der Ventilbewegung, so daß hier vorteilhaft auch das Schließen des Ventils durch die elektrische Maschine, nicht aber durch ein Rückholelement (z. B. eine Feder) erfolgt. Die Ventilbetätigung kann dadurch stoßärmer erfolgen - das bisherige "Ventilklappen" entfällt, der Verbrennungsmotor läuft also leiser.

[0028] Hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Winkelstellung des Rotors der elektrischen Maschine und Stellung des Ventils sind verschiedene Ausführungsformen möglich. Bei einer bevorzugten Ausführungsform entspricht eine Position des Anlenkungspunkts am unteren Scheitel des geneigten Kreises der Offenstellung des Ventils und eine Position des Anlenkungspunkts am oberen Scheitel der Ge-

geschlossenstellung. Für eine Öffnungs- bzw. Schließbewegung muß die elektrische Maschine daher den Anlenkungspunkt jeweils von einem zum anderen Scheitel drehen, also jeweils eine Drehung von ungefähr  $180^\circ$  ausführen. An den Scheitelpunkten des geneigten Kreises verläuft die Kreisbahn senkrecht zur Ventilhubrichtung, weshalb eine Kraft in Richtung des Ventilschafts zu keinem Drehmoment auf den Rotor führt. Aus diesem Grund braucht die elektrische Maschine kein oder nur ein geringes Haltemoment aufbringen, um das Ventil in der Geschlossenstellung zu halten. Allerdings benötigt bei dieser Ausführungsform die elektrische Maschine relativ große Drehwinkel, um das geschlossene Ventil etwas zu öffnen oder das bereits teilweise geschlossene Ventil ganz zu schließen. Denn der Zusammenhang zwischen Winkelstellung der elektrischen Maschine und Hubstellung des Ventils entspricht einer Kosinusfunktion, deren oberer und unterer Scheitelpunkt der Geschlossenstellung bzw. Offenstellung des Ventils entspricht; diese Funktion ist aber im Bereich der Scheitelpunkte (d. h. also insbesondere bei der Geschlossenstellung) flach. Um angesichts der Flachheit eine schnelle Ventilöffnung zu erzielen, sollte die Maschine sehr schnell aus dem Stand beschleunigen können. Vorteilhaft ist daher eine Ausführung der elektrischen Maschine mit möglichst geringem Trägheitsmoment. Um eine relativ lange effektive Ventilöffnungszeit zu erzielen, kann die elektrische Maschine vorteilhaft so angesteuert werden, daß sie zum Öffnen des Ventils zunächst schnell auf eine relativ hohe Winkelgeschwindigkeit beschleunigt wird, dann, wenn das Ventil weitgehend geöffnet ist, auf eine niedrigere Winkelgeschwindigkeit oder sogar auf Stillstand abgebremst wird, dann zum Schließen des Ventils wieder auf eine relativ hohe Winkelgeschwindigkeit beschleunigt und schließlich bei Erreichen der Geschlossenstellung zum Stillstand gebremst wird. Aufgrund der verschwindenden Steigung der Kosinusfunktion am Scheitelpunkt ist es auch möglich, die elektrische Maschine zum Öffnen des Ventils bereits vor dem gewünschten Öffnungszeitpunkt loslaufen zu lassen und/oder zu dessen Schließen erst nach dem gewünschten Schließzeitpunkt zum Stillstand zu bringen. Dies führt nur zu einer vernachlässigbar kleinen verfrühten bzw. verspäteten Ventilöffnung. Vorteil dieser Maßnahme ist jedoch, daß die effektive Ventilöffnungszeit verlängert wird.

[0029] Es sind übrigens auch Varianten möglich, bei denen der Anlenkungspunkt in der Geschlossenstellung des Ventils ein wenig jenseits des Scheitelpunkts der Kreisbahn gewählt wird. Zum Öffnen des Ventils läuft der Anlenkungspunkt dann zunächst auf den Scheitelpunkt zu, durchläuft ihn und läuft dann auf der anderen Seite des Scheitelpunkts entlang der geneigten Kreisbahn, wodurch dann das Ventil geöffnet wird. Die elektrische Maschine kann hierdurch bereits vor dem eigentlichen Öffnungszeitpunkt auf eine relativ hohe Winkelgeschwindigkeit beschleunigt werden, wodurch die verzögernde Wirkung von Trägheitskräften verringert wird. Entsprechend läuft der Anlenkungspunkt zum Schließen des Ventils über den Scheitelpunkt hinaus und kommt erst etwas jenseits des Scheitelpunkts zum Stehen.

[0030] Bei einer zweiten bevorzugten Ausführungsform entspricht hingegen der Geschlossenstellung des Ventils ein Anlenkungspunkt, der zwischen dem oberen und unteren Scheitelpunkt liegt, also in einem Bereich, in dem die Kreisbahn relativ stark geneigt ist. Ein bevorzugtes Beispiel ist eine Lage in der Mitte zwischen dem oberen und unteren Scheitelpunkt. Wegen der Neigung führt eine Drehung der elektrischen Maschine im Bereich der Geschlossenstellung zu einer relativ großen Hubbewegung des Ventils, was für ein schnelles Öffnen und Schließen des Ventils vorteilhaft ist. Allerdings führt bei dieser Ausführungsform eine Kraft

in Ventilrichtung zu einem Drehmoment auf den Rotor, so daß die elektrische Maschine zum Geschlossenhalten des Ventils ein Haltemoment aufzubringen hat (sofern keine Selbsthemmung vorliegt oder eine andere Halteeinrichtung vorgesehen ist).

[0031] Wie bei der obigen ersten Ausführungsform kann das Öffnen und anschließende Schließen des Ventils durch eine zusammenhängende Rotordrehung erfolgen, die hier allerdings weniger als  $360^\circ$  (beim vorliegenden Beispiel  $180^\circ$ ) beträgt. Die Winkelgeschwindigkeit kann dabei von den Anfangs- und Endbereichen wegen der dort erforderlichen Beschleunigung abgesehen – im wesentlichen konstant sein. Alternativ ist es aber auch möglich, die Winkelgeschwindigkeit in dem Bereich zwischen Offen- und Geschlossenstellung herabzusetzen oder den Rotor kurzzeitig ganz zum Stillstand zu bringen, um eine lange Ventilöffnungszeit zu erzielen.

[0032] Bei der erstgenannten Ausführungsform, bei welcher der untere und obere Scheitel der geneigten Kreisbahn der Offen- bzw. Geschlossenstellung des Ventils entspricht, ist es möglich, die Ventilbetätigungen fortlaufend durch Rotordrehung in nur einer Drehrichtung auszuführen. Alternativ ist eine oszillierende Betriebsweise möglich, bei welcher die elektrische Maschine ihre Drehrichtung nach jedem Öffnungs-Schließ-Zyklus ober innerhalb eines jeden solchen Zyklus wechselt. Bei der zweitgenannten Ausführungsform, bei welcher eine Anlenkungspunktposition im Bereich zwischen dem oberen und dem unteren Scheitelpunkt der Geschlossenstellung des Ventils entspricht, arbeitet die elektrische Maschine in jedem Fall oszillierend, da im oberen Bereich liegende Teile der Kreisbahn nicht durchfahren werden können.

[0033] Mit der elektrischen Maschine können, wie bei einem Positionierantrieb, bestimmte Anfangs- und Endpunkte (beispielsweise die Scheitelpunkte) angefahren und außerdem einzelne Kreissegmente mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durchfahren werden, um bestimmte gewünschte Öffnungs- und Schließbewegungen des Ventils zu realisieren. Grundsätzlich kann die elektrische Maschine als Asynchronmaschine ausgeführt sein. Wegen der einfacheren Steuerbarkeit und dem besser definierten Zusammenhang zwischen dem drehmomenterzeugenden Magnetfeld und der Winkelstellung des Rotors ist jedoch eine Ausbildung als Synchronmaschine bevorzugt. Zur Positionierung und geschwindigkeitsvariablen Steuerung ist vorteilhaft eine Rückmeldung der momentanen tatsächlichen Rotor- oder Ventilstellung an die Steuerung der elektrischen Maschine vorgesehen. Besonders vorzugsweise ist die elektrische Maschine als Schrittmotor ausgebildet, insbesondere in Form einer hochpoligen Synchronmaschine, die beispielsweise permanenterregt ist (siehe z. B. Peter F. Brosch: "Moderne Stromrichterantriebe", 2. Auflage, 1992, Seiten 202–211). Bei einem solchen Schrittmotor ist eine schrittgenaue Positionierung durch Vorgabe von Steuerimpulsen möglich. Eine Rückmeldung der tatsächlichen Stellung des Rotors ist dabei nicht erforderlich, kann aber vorteilhaft sein, um feststellen zu können, ob der Schrittmotor aus dem Tritt gefallen ist. Mit einem solchen Schrittmotor ist es durch entsprechende Vorgabe der Steuerimpulse auf besonders einfache Weise möglich, bestimmte Winkelstellungen anzufahren und einzelne Kreissegmente mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu durchfahren.

[0034] Auch wenn ein Ventil nicht mit einer Ventildfeder ausgerüstet ist, ist zum Ventilöffnen Arbeit aufzubringen. Hierbei handelt es sich neben Reibungsarbeit und Kompressionsarbeit (im Fall, daß beim Öffnen Überdruck im Zylinder herrscht) um Beschleunigungsarbeit. Letztere wird in kinetische Energie des sich bewegenden Ventils umgewan-

delt. Im weiteren Verlauf der Öffnungsbewegung wird das Ventil wieder abgebremst und zum Stillstand gebracht, die kinetische Energie also wieder herausgenommen. Im Prinzip kann diese wiedergewonnene Energie "vernichtet" (d. h. beispielsweise in Wärme dissipiert) werden. Im Hinblick auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad ist es jedoch bevorzugt, die kinetische Energie zu rekuperieren. Während die elektrische Maschine beim Beschleunigen des Ventils als Motor arbeitet und elektrische Energie durch Leisten mechanischer Arbeit in kinetische Energie umwandelt, arbeitet sie zwecks Rekuperation dieser Energie beim anschließenden Abbremsen als Generator, welcher die kinetische Energie durch Bremsarbeit in elektrische Energie zurückverwandelt. Diese Energie wird zwischengespeichert und für die nächste Ventilbeschleunigung wiederverwendet. Die Zwischenspeicherung erfolgt vorzugsweise in einem Kondensatorspeicher oder einer geeigneten schnellen Batterie. Prinzipiell kann die Beschleunigungsarbeit wegen des unter 100% liegenden Wirkungsgrads der elektrischen Maschine und des Energiespeichers nicht vollständig rekuperiert werden. Dennoch verringert sich die zum Betreiben des Ventiltriebs erforderliche effektive Leistung gegenüber Ausführungsformen, bei denen die Bremsenergie verheizt wird.

[0035] Bei der bevorzugten Ausführungsform des Verbrennungsmotors ist jedes Einlaß- und Auslaßventil mit einem eigenen elektrischen Ventiltrieb ausgerüstet. Da eine in manchen Fällen ausreichende Variabilität der Steuerzeiten allein durch variable Ansteuerung der Einlaßventile (oder ev. allein der Auslaßventile) erzielt werden kann, sind auch Hybride möglich, bei denen nur die Einlaßventile (bzw. nur die Auslaßventile) einzeln durch elektrische Maschinen der hier beschriebenen Art angetrieben werden, wohingegen die anderen Ventile durch eine herkömmliche, von der Pleuellwelle angetriebenen Pleuellwelle betätigt werden.

[0036] Nun zurückkommend zu den Fig. 1 und 2, ist dort ein elektrischer Ventiltrieb gemäß einer ersten Ausführungsform in Seiten-Schnittansicht und Draufsicht schematisch dargestellt. Bei dieser Ausführungsform entsprechen die Scheitelpunkte der geneigten Kreisbahn der Offen- und Geschlossenstellung des Ventils. Fig. 1a zeigt die Offenstellung, und Fig. 1b die Geschlossenstellung. Das Gaswechselventil 1 weist einen Ventilteller 2 und einen Ventilschaft 3 auf. Es ist mit dem Ventilschaft 3 in einer Ventilfehrung 4 geföhrt, welche eine Verschiebung des Ventils 1 längs einer Ventilhubachse 12 sowie eine Drehung des Ventils 1 zuläßt. Das Ventil 1 sitzt in Geschlossenstellung (Fig. 1b) in einem Ventilsitz 5, wodurch es einen Luftkanal 6 gegenüber einem Zylinderraum 7 eines Verbrennungsmotors hermetisch abschließt. In der Offenstellung (Fig. 1a) ist das Ventil 1 um den maximalen Ventilhub H in Richtung Zylinder verschoben, so daß zwischen Ventilteller 2 und Ventilsitz 5 eine Ventilöffnung vorliegt, durch die Gas aus dem Luftkanal 6 in den Zylinder (oder umgekehrt) strömen kann.

[0037] Eine elektrische Maschine 8 sorgt für den Antrieb des Ventils 1. Sie weist einen Stator 9 und einen drehbar im Gehäuse gelagerten Rotor 10 auf. Bei der elektrischen Maschine handelt es sich um eine vielpolige permanentterregte Synchronmaschine, die als Positionierantrieb nach Art eines Schrittmotors ausgebildet ist. Die Achse 11 des Rotors 10 ist gegenüber der Ventilhubachse 12 um einen Winkel  $\alpha$  geneigt angeordnet.

[0038] Das Ventil 1 ist mit dem Rotor 10 durch eine Koppelstange 15 gekoppelt, welche quer zur Ventilhubachse 12 verläuft. Ein Ende der Koppelstange 15 ist an einem Anlenkungspunkt 13 mit dem Rotor 10 durch ein Drehgelenk 16 verbunden. Der Anlenkungspunkt 13 liegt in der Mittelebene des Rotors 10 an dessen innerem Umfang. Das Drehgelenk 16 erlaubt Relativdrehungen zwischen Rotor 10 und

Koppelstange 15 in allen drei Drehrichtungen. Am anderen Ende ist die Koppelstange 15 längsverschiebbar mit dem äußeren Ende des Ventilschafts 3 gekoppelt. Hierzu dient eine Führung 14, welche eine Relativverschiebung von Koppelstange 15 und Ventilschaft 3 der zur Ventilhubachse 12, jedoch keine Relativdrehung zwischen beiden erlaubt. Insgesamt ist hierdurch zwischen Rotor 10 und Ventil 1 ein Drehgelenk mit Längenausgleich realisiert.

[0039] Bei einer anderen Ausführungsform erlaubt die Führung 14 auch eine Drehung um die Längsachse der Koppelstange 15, sie stellt also auch diesen Drehfreiheitsgrad bereit. Das Drehgelenk 116 braucht dann für diesen Drehfreiheitsgrad nicht zu sorgen. Bei anderen (nicht gezeigten) Ausführungsformen sorgt hingegen das Drehgelenk 16 auch für den Längenausgleich. Beispielsweise kann es mit ausreichendem Spiel ausgestattet sein, welches den Längenausgleich erlaubt. Die Koppelstange 15 und der Ventilschaft 3 sind bei solchen Ausführungsformen i. a. einstückig und starr miteinander verbunden.

[0040] Eine Ventilbetätigung im Rahmen eines Arbeitszyklus des Verbrennungsmotors läuft folgendermaßen ab: Zunächst befindet sich das Ventil 1 in der, in Fig. 1b gezeigten Geschlossenstellung. Zum Öffnen des Ventils 1 wird die elektrische Maschine 8 nun so angesteuert, daß sich der Rotor 10 und mit ihm der Anlenkungspunkt 13 um 180° dreht (siehe Fig. 2), wodurch er in die in Fig. 1a gezeigte Stellung gelangt. Aufgrund der Schrägstellung der Rotorachse 11 geht mit dieser Drehung eine Versetzung des Anlenkungspunkts 13 in Richtung der Ventilhubachse 12 um den maximalen Hub H einher. Die Koppelstange 15 wirkt dabei als Hebel, welcher die Versetzung und Drehung des Anlenkungspunkts 13 auf das Ventil 1 überträgt, so daß das Ventil 1 in die in Fig. 1a gezeigte Offenstellung gebracht und um 180° gedreht wird. Bei anderen Ausführungsformen, bei denen eine solche Ventildrehung vermieden werden soll, ist der Ventilschaft in der Ventilfehrung gegen Verdrehung gesichert, und es ist am Ventilschaft ein weiteres Drehgelenk vorgesehen, welches die dann nötige Drehung zwischen Koppelstange und Ventilschaft um die Ventilhubachse erlaubt.

[0041] Zwischen dem maximalen Ventilhub H, dem Abstand R des Anlenkungspunkts 13 von der Rotorachse und dem Neigungswinkel  $\alpha$  besteht die Beziehung:  $H = 2 R \sin \alpha$ . Beispielsweise ergibt ein Neigungswinkel von 7° und ein Abstand des Anlenkungspunkts 13 von der Rotorachse 11 von 20 mm einen maximalen Ventilhub H von ungefähr 5 mm. Zur Veranschaulichung ist der Neigungswinkel  $\alpha$  in Fig. 1 (und ebenso in Fig. 4) übertrieben groß dargestellt.

[0042] Um das Ventil wieder zu schließen, erfolgt wiederum eine 180°-Drehung des Rotors in die in Fig. 1b gezeigte Geschlossenstellung (siehe Fig. 2). Wenn relativ lange Ventilöffnungszeiten erforderlich ist, kann die elektrische Maschine in der Offenstellung vollständig stillgesetzt werden. Die Öffnungsdrehung und die Schließdrehung sind dann voneinander entkoppelt und können wahlweise in der gleichen oder in entgegengesetzten Drehrichtungen erfolgen. Wenn hingegen kürzere Ventilöffnungszeiten genügen, so ist kein Stillsetzen des Rotors 10 in der Offenstellung erforderlich, vielmehr bilden dann Öffnungs- und Schließdrehung Teile einer durchgehenden Rotordrehung um 360°. Grundsätzlich ist es möglich, diese 360°-Drehung nach einer Anfang- und vor einer Endbeschleunigung mit im wesentlichen konstanter Winkelgeschwindigkeit durchzuführen. Es ist aber auch möglich, die Drehgeschwindigkeit im Laufe der 360°-Drehung zu variieren, beispielsweise zunächst den Rotor 10 auf eine relativ hohe Anfangsgeschwindigkeit zu beschleunigen, anschließend wieder abzubrem-

sen, so daß der Übergang von Öffnungs- zu Schließdrehung relativ langsam durchlaufen wird, und ihn anschließend im Verlauf der Schließdrehung wieder auf eine relativ hohe Endgeschwindigkeit zu beschleunigen, bis er schließlich bei Erreichen der Geschlossenstellung wieder zum Stillstand abgebremsst wird. Diese letztgenannte Möglichkeit ist in Fig. 3 veranschaulicht, worin als Funktion des Rotordrehwinkels  $w$  sowohl die Ventilstellung wie auch die momentane Rotorwinkelgeschwindigkeit  $dw/dt$  dargestellt sind.

[0043] Im folgenden Absatz soll noch die Kopplung von Ventil 1 und Rotor 10 im Hinblick auf die Relativneigung von Rotorachse 11 und Ventillängsachse 12 vertieft dargestellt werden. Wäre keine derartige Relativneigung vorhanden, so könnte das Ventil 1 starr mit dem Rotor 10 gekoppelt sein (allerdings würde eine Rotordrehung dann keine Hubbewegung des Ventils bewirken). Aufgrund der für die Hubbewegung erforderlichen Relativneigung ändert jedoch die Koppelstange 15 ihren Anstellwinkel relativ zum Rotor 10, an dem sie im Anlenkungspunkt 13 angelenkt ist. Und zwar hat dieser Anstellwinkel beispielsweise in der Offenstellung gemäß Fig. 1a den Wert  $a$  relativ zur Ebene des schräggestellten Kreises. Nach einer Drehung um  $180^\circ$ , also in Geschlossenstellung gemäß Fig. 1b hat der Anstellwinkel hingegen einen Wert von  $-a$ . Er hat sich also im Verlauf einer  $180^\circ$ -Drehung um  $2a$  geändert. Außerdem kommt es im Verlauf einer  $180^\circ$ -Drehung des Rotors 10 zu einer Relativdrehung zwischen Koppelstange 15 und Rotor 10 um die Längsachse der Koppelstange 10, welche bei Geschlossenstellung beispielsweise  $0^\circ$ , bei Halboffenstellung  $a$  und bei Offenstellung wiederum  $0^\circ$  beträgt. Im Hinblick auf diese beiden hauptsächlichsten Relativbewegungen zwischen Ventil 1 und Rotor 10 erlaubt das Drehgelenk 16 Drehungen mit zwei Freiheitsgraden, und zwar Relativdrehungen um eine Achse, die durch den Anlenkungspunkt 13 tangential zu dessen Kreisbahn verläuft sowie Relativdrehungen um die Längsachse der Koppelstange 15, wobei der letztere Freiheitsgrad – wie gesagt – auch durch die Führung 14 am Ventilschaft 3 vermittelt werden kann. Weitere, wenn auch geringfügigere Relativbewegungen zwischen Ventil 1 und Rotor 10 rühren daher, daß die geneigte Kreisbahn, entlang welcher sich der Anlenkungspunkt 13 bei der Drehung des Rotors 10 um die Rotorachse 11 bewegt, in Projektionsrichtung der Ventilhubachse 12 als Ellipse erscheint. Die lange Hauptachse dieser Ellipse gleicht dem Durchmesser der geneigten Kreisbahn, ihre kurze Hauptachse ist demgegenüber jedoch um den Faktor  $\cos a$  verkürzt. Wegen dieser Elliptizität ist die Koppelstange 15 längsverschieblich gelagert, um den Längenausgleich entsprechend dem halben Längensunterschied der beiden Hauptachsen im Verlauf einer Rotordrehung zu gewährleisten. In Fig. 2 ist die Verkürzung der Ellipse und damit der effektiven Länge der Koppelstange 15 zwecks Veranschaulichung stark übertrieben dargestellt. Bei den in der Praxis geringen Neigungswinkeln  $a$  sind die Elliptizität der Ellipse und damit der erforderliche Längenausgleich gering. Bei dem oben genannten Beispiel eines Neigungswinkels  $a = 7^\circ$  und einem Radius der geneigten Kreisbahn von 20 mm beträgt der erforderliche Längenausgleich (d. h. die Hälfte des Unterschieds zwischen großer und kleiner Ellipsenhauptachse) nur ungefähr 0,15 mm. Für diesen Längenausgleich kann eine Längsführung vorgesehen sein, wie in Fig. 1 gezeigt, es ist jedoch auch möglich, allein das Drehgelenk mit ausreichendem Spiel für den Längenausgleich auszustatten. Eine gesonderte Längsführung kann dann entfallen. Ein weiterer Unterschied zwischen Kreis- und Ellipsengeometrie besteht darin, daß beim Kreis dessen Durchmesser immer senkrecht auf der Kreisbahn am Schnittpunkt steht, während bei der Ellipse von den durch den Mittelpunkt verlaufenden Sehnen nur die beiden Haupt-

achsen unter  $90^\circ$  auf der Ellipse stehen, die Sehnen in den Winkelbereichen dazwischen jedoch von  $90^\circ$  abweichende Winkel zur Ellipse haben. Diese Abweichungen von  $90^\circ$  sind bei der hier vorliegenden kleinen Elliptizität sehr gering. Das Drehgelenk 16 läßt diese sehr geringen Drehungen um eine Achse durch den Anlenkungspunkt 13 parallel zur Rotorachse 11 zu, indem es als Drehgelenk mit drei Freiheitsgraden (z. B. Kugelgelenk) ausgebildet ist. Alternativ ist auch ein Drehgelenk mit nur den beiden oben genannten Haupt-Drehfreiheitsgraden möglich, welches mit ausreichend Spiel ausgestattet ist, um auch die geringfügigen Drehungen um die genannte dritte Achse zu erlauben.

[0044] Die Fig. 4 und 5 veranschaulichen eine zweite Ausführungsform, bei welcher eine Position des Anlenkungspunkts 13 im Bereich zwischen dem oberen und dem unteren Scheitelpunkt der geneigten Kreisbahn der Geschlossenstellung des Ventils entspricht. Die obigen Ausführungen zu den Fig. 1 bis 3 treffen auch für diese zweite Ausführungsform zu, abgesehen von den im folgenden erläuterten Unterschieden.

[0045] In den Figuren gezeigt ist ein Beispiel, bei dem sich der Anlenkungspunkt 13 bei Geschlossenstellung des Ventils 1 in der Mitte zwischen dem oberen und unteren Scheitelpunkt befindet, also bei einem Drehwinkel von  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$  (bezogen auf  $0^\circ$  beim oberen Scheitelpunkt, siehe Fig. 2 und 5). Bei der Offenstellung des Ventils 1 liegt der Anlenkungspunkt bei  $180^\circ$ , wie bei der ersten Ausführungsform. Um das Ventil 1 von der Geschlossen- in die Offenstellung zu bringen, genügt also ein Winkel kleiner als  $180^\circ$ , und zwar bei dem hier gezeigten Beispiel  $90^\circ$ . Um bei diesem kleineren Drehwinkel dennoch einen entsprechenden maximalen Ventilhub  $H$  zu erzielen, ist vorzugsweise ein entsprechend größerer Neigungswinkel  $a$  zwischen Rotorachse 11 und Ventillängsachse 12 vorgesehen. Alternativ kann auch ein Rotor mit weiter außen liegendem Anlenkungspunkt 13 gewählt werden.

[0046] Vorteilhaft bei dieser zweiten Ausführungsform ist, daß das Ventil 1 schneller geöffnet und geschlossen werden kann als bei der ersten Ausführungsform, da bei einer Winkelstellung des Anlenkungspunkts zwischen den Scheitelpunkten eine Drehung um einen bestimmten Drehwinkel zu einer größeren Ventilhubbewegung führt, als bei einer Stellung in der Nähe eines Scheitelpunkts. Am stärksten ist dieser Effekt bei der beispielhaft in den Fig. 4 und 5 gezeigten Wahl einer Winkelstellung von  $90$  bzw.  $270^\circ$  für die Geschlossenstellung. Bei diesen Winkeln ist der kosinusförmige funktionelle Zusammenhang zwischen Winkel und Ventilstellung am steilsten, so daß hier mit der kleinsten Winkeländerung die größtmögliche Ventilbewegung erzielt wird.

[0047] Fig. 6 veranschaulicht diesen funktionellen Zusammenhang und zeigt außerdem ein Beispiel für eine mögliche Wahl der Rotordrehgeschwindigkeit  $dw/dt$  als Funktion des Winkels. Die Winkelbereiche zwischen  $0$  und  $90^\circ$  und  $270$  und  $360^\circ$  sind hier nicht zugänglich. Je nachdem, wie lange das Ventil offen gehalten werden soll, ist es (wie bei der ersten Ausführungsform) möglich, die Schließbewegung an die Öffnungsbewegung ohne Stillsetzung des Rotors 3 durchzuführen, oder, alternativ den Rotor in der Offenstellung stillzusetzen. Im ersteren Fall ist es wiederum möglich, die Öffnungs- und Schließbewegung mit im wesentlichen gleicher Drehgeschwindigkeit durchzuführen, oder, alternativ, die Drehgeschwindigkeit im Bereich der Offenstellung herabzusetzen, wie dies der in Fig. 6 beispielhaft gezeigte Verlauf von  $dw/dt$  veranschaulicht. Der Rotor 12 führt dann für eine Öffnungs- und Schließbewegung eine durchgehende  $180^\circ$ -Drehung durch. Bei der zweiten Alternative mit Rotorstillstand in der Offenstellung kann die



Schließdrehung mit gleicher oder entgegengesetzter Drehrichtung wie die vorausgegangene Öffnungsdrehung erfolgen.

[0048] Während die Fig. 1, 2, 4 und 5 den mechanischen Teil des Ventiltriebs zeigen, veranschaulicht Fig. 7 anhand einer Funktionsblockdarstellung dessen Speisung und Steuerung. Die elektrische Maschine 8 ist eine vielpolige Synchronmaschine, deren Rotor 10 mit Permanentmagneten bestückt ist. Sie weist im Stator 9 eine Mehrphasenwicklung auf, vorzugsweise eine 3-Phasenwicklung (auch 4- oder 5-Phasenwicklungen sind alternativ möglich). Zur Ansteuerung der Phasenwicklungen ist ein Wechselrichter 21 vorgesehen, welcher mit Hilfe elektronischer Schalter die geeigneten, zeitlich sich ändernden Phasenspannungen aus der Gleichspannung eines Gleichspannungs-Zwischenkreises 22 erzeugt. Dieser ist über einen Spannungswandler 23 mit dem Bordnetz 24 des Kraftfahrzeugs gekoppelt. Vorzugsweise laufen der Gleichspannungs-Zwischenkreis 22 und das Bordnetz 24 im wesentlichen auf gleicher Spannung, so daß der Spannungswandler 23 im wesentlichen der Stabilisierung der Zwischenkreisspannung auf einen konstanten Spannungswert dient. Bei alternativen Ausführungsformen ist es auch möglich, daß die Zwischenkreisspannung über oder unter der Bordnetzspannung liegt; der Spannungswandler 23 arbeitet dann als Spannungshochsetzer bzw. -tiefsetzer. Es ist andererseits auch möglich, den Spannungswandler 23 entfallen zu lassen; der Zwischenkreis 22 ist dann Teil des Bordnetzes 24. Im Zwischenkreis 22 ist ferner ein Zwischenspeicher 25 angeordnet, welcher der kurzzeitigen Zwischenspeicherung von "Blindenergie" dient und hierzu als Kondensatorspeicher (vorzugsweise auf der Grundlage von Doppelschichtkondensatoren) oder elektrochemische Kurzzeitbatterie ausgebildet ist. Die elektrische Maschine 8 arbeitet bei positiver Beschleunigung motorisch, bei negativer Beschleunigung generatorisch. Bei motorischem Betrieb fließt elektrische Energie aus dem Zwischenkreis 22 durch den Wechselrichter 21 in die elektrische Maschine 8; bei generatorischem Betrieb fließt elektrische Energie in umgekehrter Richtung aus der elektrischen Maschine 8 über den Wechselrichter 21 (der dann die induzierten Phasenspannungen gleichrichtet) in den Zwischenkreis 22. Die bei generatorischem Betrieb in den Zwischenkreis 25 zurückfließende Energie stellt die Blindenergie dar und wird im Zwischenspeicher 25 gespeichert. Der Differenzbetrag, um den die für motorischen Betrieb benötigte Energie größer als die Blindenergie ist, wird aus dem Bordnetz 24 über den Spannungswandler 23 in den Zwischenkreis 25 eingespeist. Diese zusätzliche Energie kompensiert die Verluste der elektromechanischen Wandlung und Energiespeicherung, und fließt außerdem in die Reibungsarbeit sowie eine etwaige Kompressionsarbeit, dient also denjenigen Anteilen, welche zusätzlich zu der hin- und hergeschauelten Beschleunigungs- und Bremsenergie aufzubringen sind. Ein Vorteil der Anordnung des Zwischenspeichers 25 im Zwischenkreis 22 ist, daß die Blindenergie nicht über den Spannungswandler 23 hin- und hergeschauelt zu werden braucht. Andere (nicht gezeigte) Ausführungsformen machen von diesem Vorteil keinen Gebrauch; bei ihnen ist kein gesonderter Zwischenspeicher vorgesehen, für die Zwischenspeicherung der Blindenergie sorgt vielmehr eine Bordnetzbatterie (z. B. die übliche Starterbatterie). Schließlich ist es auch möglich, von der Rekuperation der Bremsenergie ganz abzusehen und diese z. B. über einen Heizwiderstand in Wärme umzuwandeln.

[0049] Ein Steuergerät 26 in Form eines geeignet programmierten Mikrocomputers gibt dem Wechselrichter 21 zu jedem Zeitpunkt vor, welche Phasenspannung er erzeugen soll, d. h. welche elektronischen Schalter zu welchem

Zeitpunkt geöffnet bzw. geschlossen sein sollen. Als Eingangsgrößen erhält das Steuergerät 26 hierfür verschiedene Verbrennungsmotorparameter, und zwar insbesondere die momentane Winkelstellung  $k$  der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors, die momentane Drehzahl  $dk/dt$  der Kurbelwelle sowie die momentane Last (z. B. in Form der Fahrpedal- oder Drosselklappenstellung). Außerdem kann das Steuergerät 26 verschiedene Rückmeldegrößen aus dem Ventiltrieb erhalten, so die momentane tatsächliche Ventilstellung (z. B. in Form der momentanen Winkelstellung des Rotors 10), die Zwischenkreisspannung und ggf. die Phasenspannungen. Das Steuergerät 26 kann auch den Spannungswandler 23 ansteuern.

[0050] Fig. 8 veranschaulicht die Ausrüstung eines Verbrennungsmotors mit individuellen elektrischen Ventiltrieben. Ein hier beispielhaft gezeigter Vierzylinder-4-Takt-Verbrennungsmotor weist vier Einlaßventile 1E und vier Auslaßventile 1A auf. Jedes dieser Ventile ist mit einem eigenen Ventiltrieb gemäß den Ausführungsformen der Fig. 1 und 2 bzw. 4 und 5 ausgerüstet. Bei Verbrennungsmotoren mit mehr als einem Einlaß- bzw. Auslaßventil pro Zylinder ist es möglich, bei diesen jedes einzelne Ventil mit einem eigenen elektrischen Ventiltrieb auszurüsten. Alternativ ist es möglich, mehrere Einlaß- bzw. Auslaßventile eines Zylinders, mehrere Gruppen von Einlaß- bzw. Auslaßventilen oder sämtliche Einlaß- bzw. Auslaßventile mit einem gemeinsamen elektrischen Ventiltrieb der oben beschriebenen Art auszurüsten. Für eine gemeinsame Ansteuerung mehrerer Ventile wird die auf die Koppelstange in Ventilhubrichtung ausgeübte Stellkraft auf die Ventilschäfte der mehreren Ventile übertragen. Eine Ausrüstung mit individuellen Ventiltrieben ist jedoch im Hinblick auf konstruktive Einfachheit vorteilhaft, da sie es erlaubt, im wesentlichen ein- und dieselbe Ventiltriebkonstruktion für die verschiedensten Verbrennungsmotoren zu verwenden.

[0051] Die Anpassung eines Ventiltriebs gemäß den beschriebenen Ausführungsformen an die jeweils geforderten Steuerzeiten kann rein softwaremäßig durch entsprechende Programmierung des Steuergeräts 26 vorgenommen werden. Der maximale Hub  $H$  des Ventils läßt sich konstruktiv durch eine entsprechende Wahl des Neigungswinkels  $\alpha$  einstellen, unter dem der Rotor im Zylinderkopf des Verbrennungsmotors angeordnet wird.

[0052] Insgesamt ist es mit den offenbarten Ausführungsformen möglich, die Ventilöffnungs- und Schließbewegungen unabhängig von der Kurbelwellenstellung variabel zu regeln und damit die Nutzung des Verbrennungskraftstoffs optimal zu gestalten. Die beschriebene Konstruktion ist mechanisch relativ einfach und ist ohne besondere konstruktive Anpassung, allein über geeignete Wahl des Neigungswinkels der Rotorachse sowie durch geeignete Programmierung der Steuerung für die verschiedensten Verbrennungsmotortypen geeignet.

#### Patentansprüche

1. Elektrischer Ventiltrieb für einen Verbrennungsmotor, mit einer rotatorischen elektrischen Maschine (8), deren Rotor (10) mit einem Gaswechselventil (1) des Verbrennungsmotors (31) gekoppelt ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Rotationsachse (11) der elektrischen Maschine (8) schräg zur Hubrichtung (12) des Ventils (1) verläuft, so daß eine Drehbewegung der elektrischen Maschine (8) in eine Hubbewegung des Ventils (1) umgesetzt wird.
2. Elektrischer Ventiltrieb nach Anspruch 1, bei welchem das Ventil (1) an einem Anlenkungspunkt (13) mit dem Rotor (10) gekoppelt ist, welcher sich auf ei-



nem, gegenüber der Hubrichtung (12) des Ventils (1) geneigten Kreis bewegt.

3. Elektrischer Ventiltrieb nach Anspruch 1 oder 2, bei welchem der Rotor (10) und das Ventil (1) über ein Drehgelenk (16) gekoppelt sind.

5

4. Elektrischer Ventiltrieb nach Anspruch 3, bei welchem der Rotor (10) und das Ventil (1) so gekoppelt sind, daß ein Längenausgleich möglich ist.

5. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei welchem bei einer Ventilbetätigung das Ventil (11) um seine eigene Achse (12) gedreht wird.

10

6. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei welchem das Schließen des Ventils (1) durch die elektrische Maschine (8), nicht aber durch ein Rückholelement erfolgt.

15

7. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 2 bis 6, bei welchem eine Position des Anlenkungspunkt (13) am unteren Scheitel der geneigten Kreisbahn der Offenstellung des Ventils (1) und eine Position des Anlenkungspunkt am oberen Scheitel der geneigten Kreisbahn der Geschlossenstellung des Ventils (1) entspricht.

20

8. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 2 bis 6, bei welchem eine Position des Anlenkungspunkts im Bereich zwischen dem oberen und unteren Scheitelpunkt der geneigten Kreisbahn der Geschlossenstellung des Ventils (1) entspricht.

25

9. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 8, welcher so ausgebildet ist, daß das Öffnen und anschließende Schließen des Ventils (1) durch Rotordrehung in gleicher Drehrichtung erfolgt.

30

10. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei welchem die elektrische Maschine (8) eine Synchronmaschine ist.

11. Elektrischer Ventiltrieb nach Anspruch 10, bei welcher die elektrische Maschine (8) als Schrittmotor ausgebildet ist.

35

12. Elektrischer Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 11, bei welchem eine negative Ventilbeschleunigung durch generatorische Bremswirkung der elektrischen Maschine (8) erzielt wird.

40

13. Elektrischer Ventiltrieb nach Anspruch 12, bei welchem die bei generatorischem Bremsen gewonnene elektrische Energie gespeichert und insbesondere für den motorischen Betrieb der elektrischen Maschine (8) bei positiver Ventilbeschleunigung wieder verwendet wird.

45

14. Verbrennungsmotor mit Gaswechselventilen und wenigstens einem elektrischen Ventiltrieb nach einem der Ansprüche 1 bis 13.

50

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

---

55

60

65

- Leerseite -

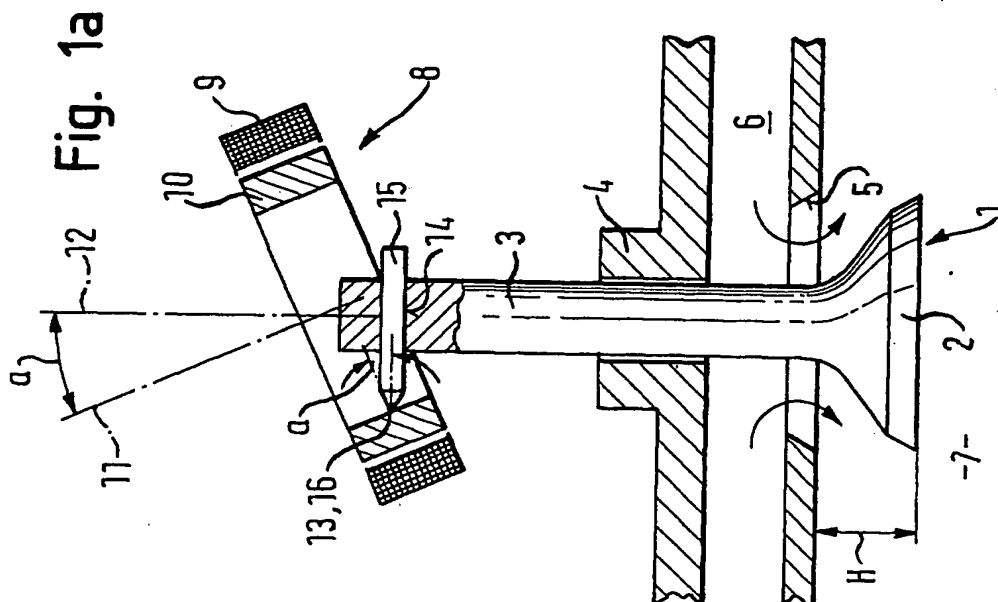
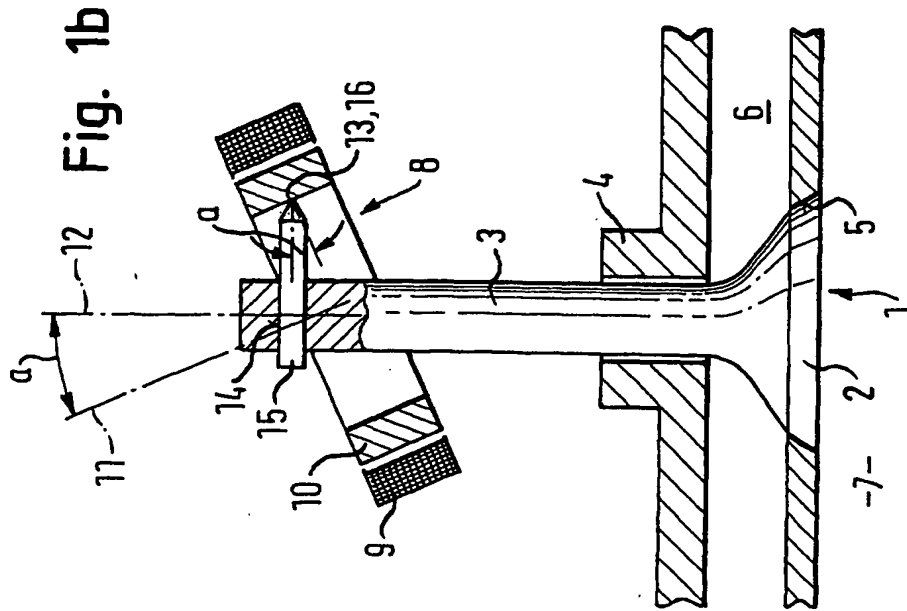


Fig. 5

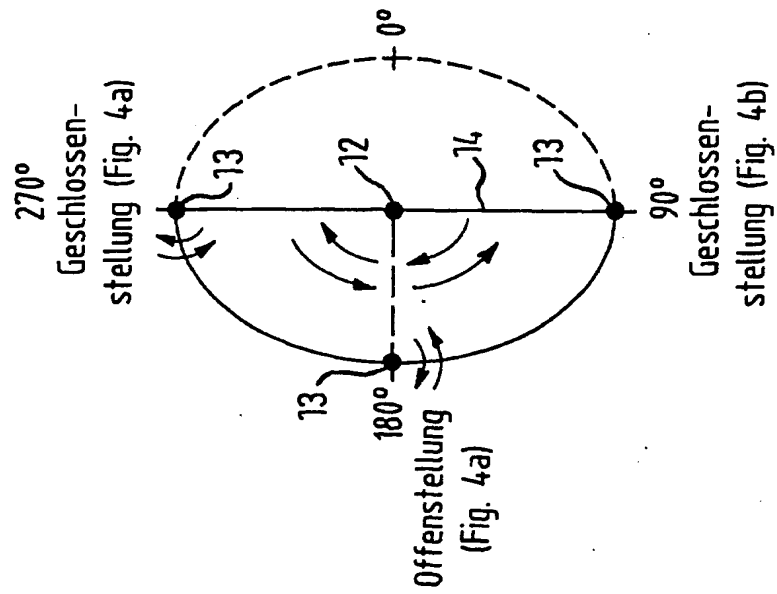


Fig. 2

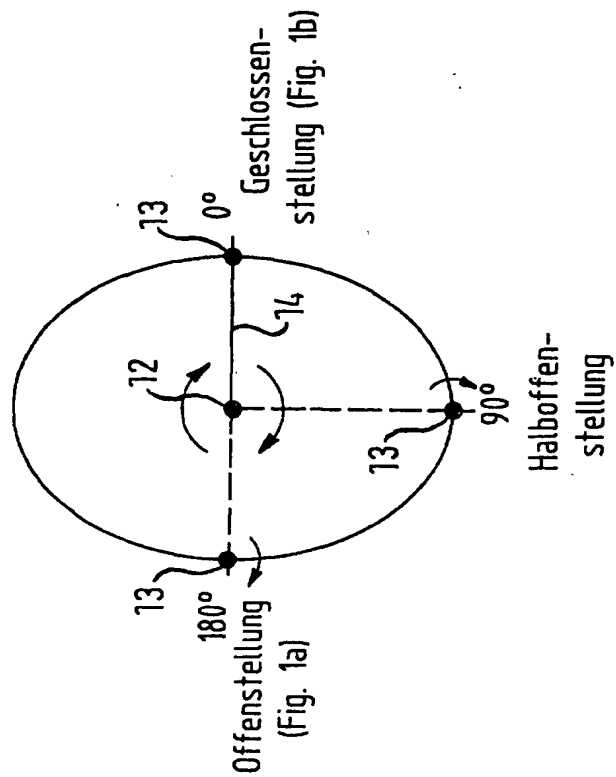


Fig. 3

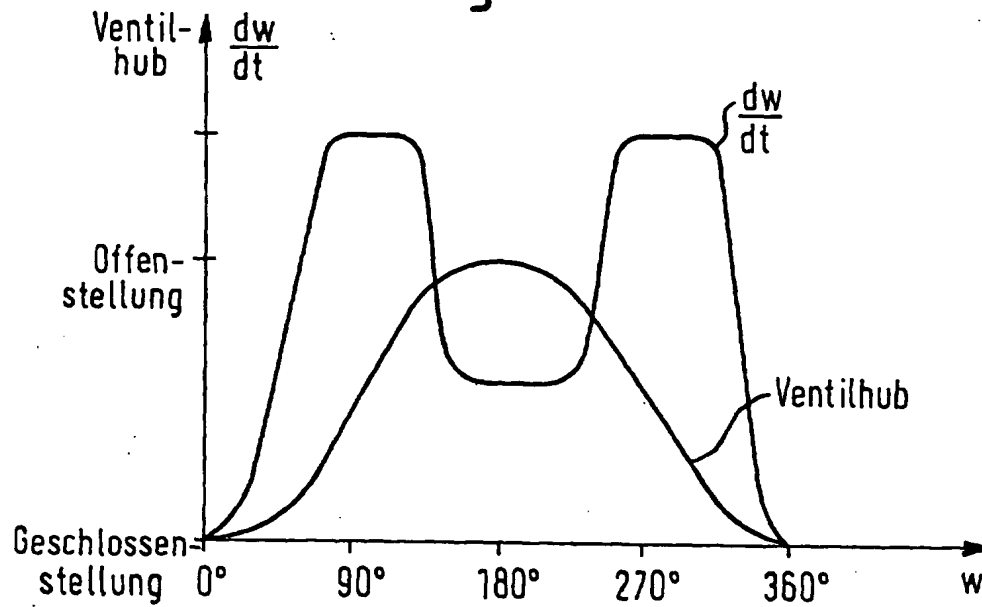
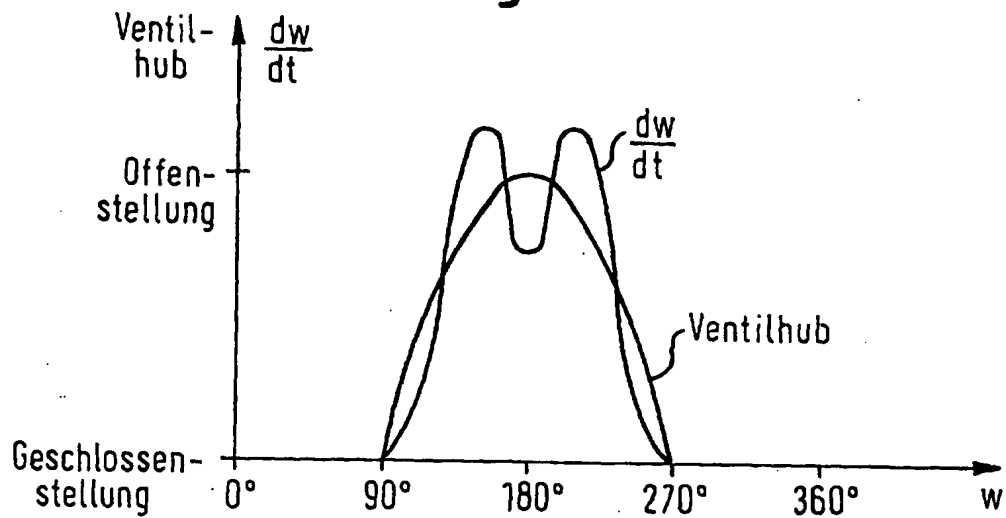


Fig. 6



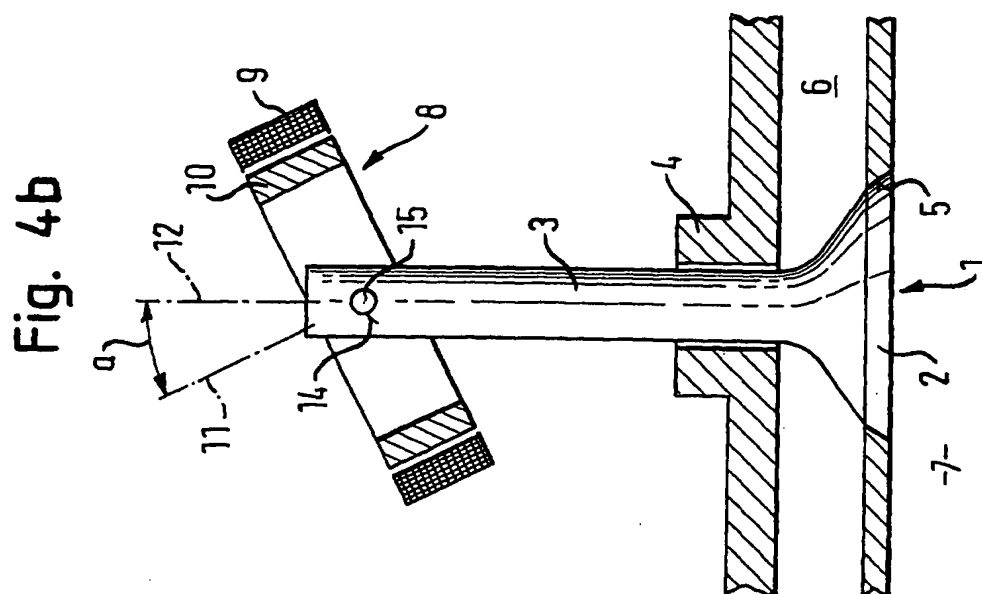


Fig. 4b

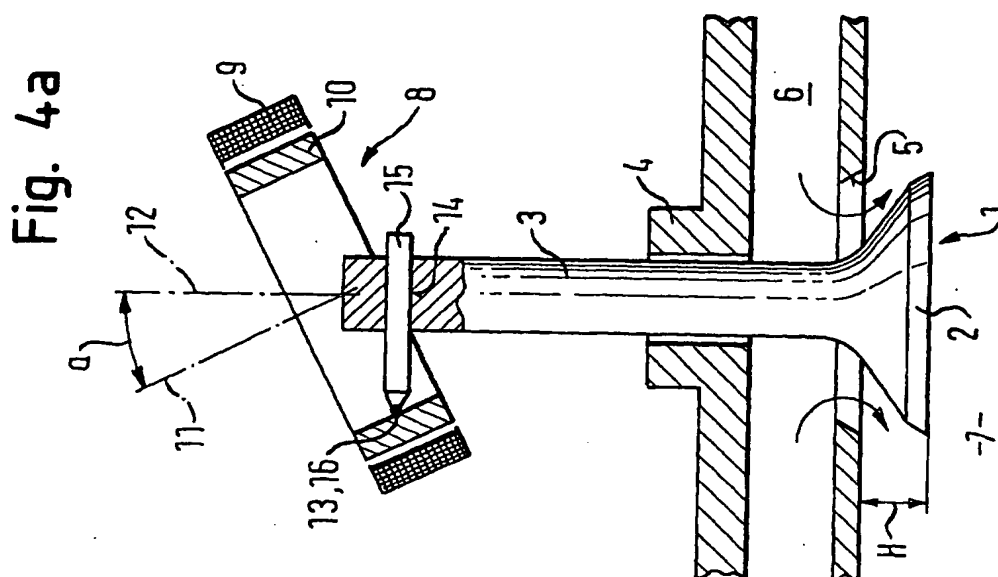


Fig. 4a

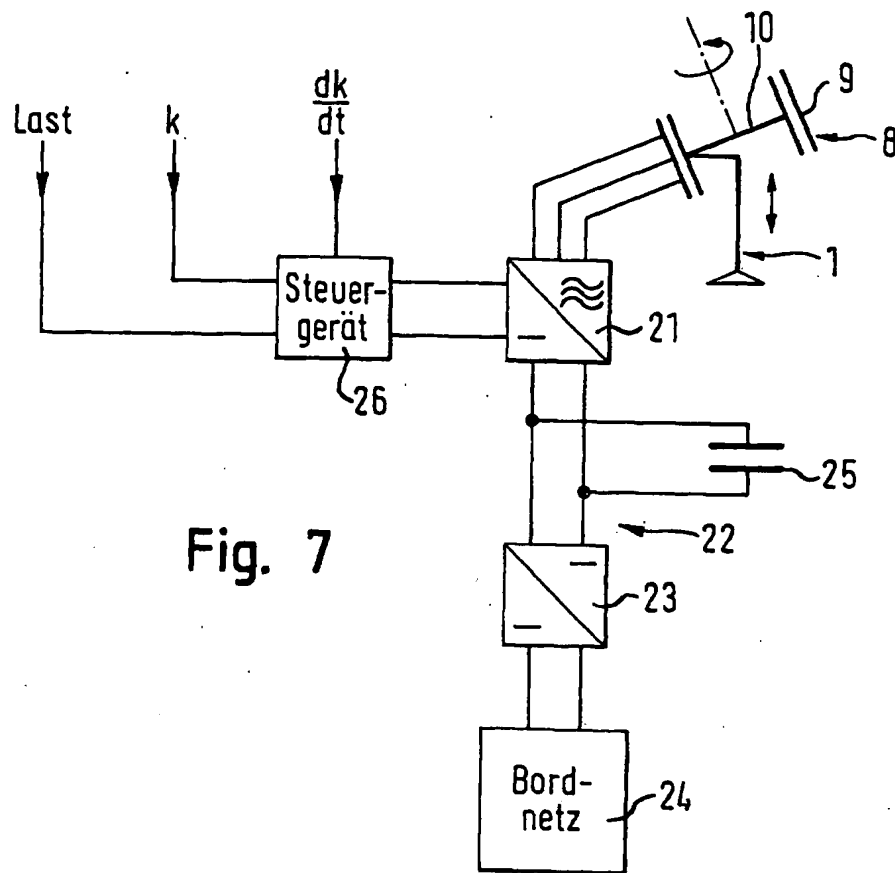


Fig. 7

Fig. 8

